

武汉大学学报(信息科学版)

*Geomatics and Information Science of Wuhan University*

ISSN 1671-8860,CN 42-1676/TN

## 《武汉大学学报(信息科学版)》网络首发论文

题目: 面向智能手机的改进有限状态机步态探测算法  
作者: 毕京学, 甄杰, 姚国标, 桑文刚, 宁一鹏, 郭秋英  
DOI: 10.13203/j.whugis20200186  
收稿日期: 2020-04-20  
网络首发日期: 2021-02-22  
引用格式: 毕京学, 甄杰, 姚国标, 桑文刚, 宁一鹏, 郭秋英. 面向智能手机的改进有限状态机步态探测算法. 武汉大学学报(信息科学版).  
<https://doi.org/10.13203/j.whugis20200186>



**网络首发:** 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认:** 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI:10.13203/j.whugis20200186

## 引用格式:

毕京学, 甄杰, 姚国标, 等. 面向智能手机的改进有限状态机步态探测算法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2020, DOI:10.13203/j.whugis20200186 (BI Jingxue, ZHEN Jie, YAO Guobiao, et al. Improved Finite State Machine Step Detection Algorithm for Smartphone[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2020, DOI:10.13203/j.whugis20200186)

## 面向智能手机的改进有限状态机步态探测算法

毕京学<sup>1</sup> 甄杰<sup>2</sup> 姚国标<sup>1</sup> 桑文刚<sup>1</sup> 宁一鹏<sup>1</sup> 郭秋英<sup>1</sup>

1 山东建筑大学测绘地理信息学院, 山东 济南, 250101

2 中国测绘科学研究院, 北京, 100830

**摘要:** 针对室内定位行人航位推算中步态探测算法步数识别准确率不够高、同步控制不够精确以及位置估计存在较大偏差等问题, 提出了一种面向智能手机平端活动的改进有限状态机步态探测算法。通过设定有限状态对应步行过程合加速度变化趋势, 利用相邻合加速度差值和上/下坡次数阈值实现步数识别和步态周期估计。在 211 米走廊内由 2 名实验人员分别平端智能手机开展实验, 结果表明: 改进算法步数识别准确率为 100%, 每一步平均识别时间提前了 0.004 秒, 平均位置误差为 0.384 米, 相比于自相关分析和加速度差分有限状态机算法, 识别准确率、同步控制精度和位置估计精度分别至少提高了 0.7%、60% 和 21.15%。本文所提算法在步数识别、同步控制以及位置估计方面优于现有算法。

**关键词:** 室内定位; 行人航位推算; 步态探测; 有限状态机; 合加速度差值; 次数阈值

中图分类号: TN96

文献标识码: A

随着我国北斗卫星导航系统全球化进程加快、5G 蜂窝移动通信网络商业化应用全面启动以及无线局域网和物联网的大面积部署, 以全球导航卫星系统 (global navigation satellite system, GNSS) 多模卫星导航为核心、以移动通信和万物互联为补充的多源传感器系统, 为包含室外城市峡谷和室内场景的位置服务提供了重要支撑。人们 80% 以上的时间处于室内环境 (含地下、矿井、隧道等), 频繁的室内活动使得室内位置服务的需求日益增长。国内外研发了基于伪卫星、激光、超宽带、计算机视觉、声波、发光二极管 (light emitting diode, LED)、紫峰 (ZigBee)、射频识别 (radio frequency identification, RFID)、惯性测量单元 (inertial measurement units, IMU)、地磁场、蓝牙和

无线仿真 (wireless fidelity, Wi-Fi) 等室内定位技术<sup>[1-2]</sup>, 可以实现厘米级~米级定位, 综合考虑定位技术实现难易程度和定位精度, 形成如图 1 所示的室内定位技术汇总。受室内多杂奇异结构和动态多变环境等因素的影响, 单一的室内定位技术难以向用户提供普适、低成本、高精度、连续的定位结果。惯性导航无缝连续, 受室内环境的影响较小, 因此, 融合 IMU 的室内多源混合定位技术应用广泛。智能手机作为最佳室内定位终端, 广泛集成了消费级 IMU, 由于存在较严重的噪声和漂移, 面向智能手机的室内惯性导航多采用行人航位推算 (pedestrian dead reckoning, PDR) 方法<sup>[3-4]</sup>。

PDR 由步态探测、步长估计和航向估计三部分组成, 由 Levi<sup>[5]</sup>首次提出, 根据行人

**收稿日期:** 2020-04-20

**项目资助:** 国家重点研发计划项目(2016YFC0803102, 2016YFB0502102); 卫星导航系统与装备技术国家重点实验室开放基金(CEPNT-2018KF-03); 山东省高等学校青创人才引育计划(0031802); 山东建筑大学开放实验项目(2019yzkf159); 山东省自然科学基金(面上项目)(ZR2017MD029); 自然资源部测绘科学与地球空间信息技术重点实验室经费资助项目(2020-3-4); 山东建筑大学博士科研基金(XNBS1985)。

**第一作者:** 毕京学, 博士, 讲师, 主要从事室内多源混合定位、室内外无缝定位技术研究。bjx1050@163.com

**通讯作者:** 甄杰, 博士, 研究员。zhenjie@casm.ac.cn

运动信息的周期性变化识别一步并计算步频和步长，结合陀螺仪等传感器估计航向，从而实现位置推算。步态探测负责识别行人是否迈出一大步，为步长估计提供步频信息，并能够为室内多源混合定位同步控制<sup>[6-8]</sup>航向输出、无线信号采集与混合定位触发等，因此，步态探测在 PDR 中具有非常重要的作用。步态探测的依据是传感器数据在步行过程中的周期性变化，常用方法有波峰检测法、零交叉法、自相关分析算法、谱分析法和有限状态机（finite state machine, FSM）法。波峰检测法<sup>[9-10]</sup>通过判定垂直方向或三轴加速度模值的波峰是否大于某一阈值来判定是否为一大步，由于行人行走过程中会产生抖动或摆动，加速度往往会出现伪波峰导致误判，而且行人行走千变万化也使得固定阈值不具有鲁棒性。零交叉法<sup>[11-12]</sup>由于需感知加速度或角速度的零值，多用于足部惯导，不适用于智能手机。自相关分析<sup>[13-14]</sup>算法以相关性分析为基础，根据固定时间窗口内两个加速度序列的相关系数阈值识别有效步数，将智能手机放在多个位置处开展步行实验，计步准确率为 98%。谱分析法需将加速度或角速度的时域信息转换至频域完成计步，基于加速度的步态探测方法<sup>[15]</sup>计步准确率为 87%，而基于角速度的方法<sup>[16]</sup>准确率为 97%。自相关分析算法和谱分析法都需要固定的较长时间窗口，对于不同速度下的行走无法准确识别步数，而且计算量大、复杂度高。FSM<sup>[17]</sup>法依据加速度变化情况将行进过程分为多种状态，通过识别状态完成计步，将智能手机放在多个位置处开展步行实验，计步准确率为 94%。为提高不同姿态下的计步准确率，许多研究人员融合多种传感器信息进行步态探测，Jang<sup>[18]</sup>利用两轴加速度信息融合了谱分析法、零交叉法和阈值法可以实现平地行走计步准确率达到 99% 以上；Jayalath<sup>[19]</sup>利用角速度信息融合零交叉和阈值探测法实现移动终端多处位置摆放慢速行走的准确步数估计，准确率约为 98%；Tang<sup>[20]</sup>利用天顶方向的加速度信息以及阈值探测和动态时间规整法实现不受行走模式约束的自适应计步方法，误判率约为

9%；Huang<sup>[21]</sup>利用天顶角速度信息以及阈值探测、自相关分析和零速更新法实现了智能手机任何摆放位置 93%~99% 的计步准确率。总体而言，现有步态探测方法具有较高的计步准确率，但是，仍然存在部分误判，无法满足现阶段普适室内定位亚米级精度的要求，而且多数步态探测方法时间同步性较差，影响室内定位与导航的用户体验。

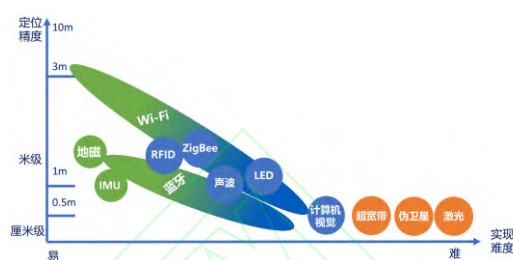


图 1 现有室内定位技术  
Fig.1 Existing Indoor Positioning Technologies

许多算法<sup>[20-23]</sup>将多种活动或运动方式以及不同步行速度与步态探测杂糅在一起进行研究，由于不同行人在不同活动下的运动特征各不相同，此类算法中的多个阈值无法适用于所有人，所以步数识别常存在较多误判；同时，很多算法<sup>[14-16]</sup>将步态探测与 PDR 割裂开来，仅研究步数识别准确率，忽略了步态周期的确定以及步态探测存在的时间偏差，毕竟步态探测不止是为了识别一步，还要确定步态周期为步长估计提供步频信息，甚至为多源混合定位提供同步控制机制。因此，本文旨在研究一种平端智能手机步行活动下的步态探测算法，提高该活动下的步数识别准确率，精确确定步态周期，并能减小识别时间偏差，从而能给满足室内亚米级定位需求。

## 1 步行动作分解和运动参数变化

如图 2 所示为行人行走一步时的动作分解及对应运动参数变化情况，图的上半部分为一步动作分解，分为蹬、起、站、跨和着，下半部分为加速度和速度的变化，实线表示加速度，虚线表示速度。行人行走一步从脚踏地开始至脚着地结束，假设右腿将要迈出一大步， $t_0$  时右脚脚跟离地，产生正向加速度并快速增大， $t_1$  时右脚脚尖离地，正向加速度达到最大值，速度不断增大，然后右脚随

右腿部抬高，正向加速度开始减小， $t_2$ 时右脚抬至最高点，正向加速度变为0，此时速度达到最大；随后，右腿开始向前跨步，右脚的高度下降，加速度方向变为负向并不断增大，速度开始减小， $t_3$ 时右脚脚跟着地，负向加速度最大， $t_4$ 时右脚脚尖着地，加速度和速度都近似为零。事实上，行走过程中的加速度变化趋势并不是严格的正弦曲线， $t_0 \sim t_1$ 和 $t_3 \sim t_4$ 的时间比较短暂，即蹬地和着地变化过程非常快。

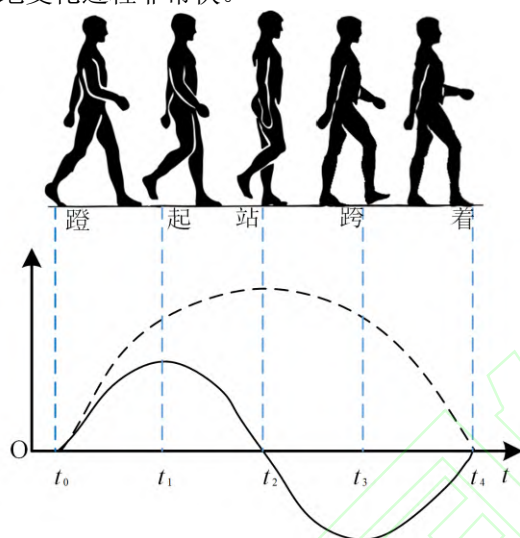


图 2 一步动作分解及对应的运动参数变化  
Fig.2 Motion Decomposition of One Step and Changes of Corresponding Parameters

## 2改进有限状态机步态探测算法

Alzantot<sup>[17]</sup>首先提出了FSM与阈值相结合的步态探测方法，依靠4个加速度经验阈值判定起始、波峰、波谷和终止等状态，并应用于正常步行、慢走和跑的步态探测中，但是行人行走习惯差异使得利用加速度阈值识别步态的普适性较差。Yim<sup>[23]</sup>在Alzantot的基础上加了一个看手表的状态，避免了行走过程中该动作的干扰。王革超<sup>[24]</sup>提出了基于差分加速度的有限状态机计步方法（acceleration differential based on finite state machine, AD-FSM），设定了3个状态，通过正/负向加速度变化次数阈值识别一步，避免了伪波峰的干扰和加速度阈值引起的误判，有助于提高识别精度和鲁棒性，但是该方法完成计步条件是进入谷值状态，忽略了脚后跟着地到整个脚掌完全着地的时

间，步态周期估算错误。虽然Alzantot提出了利用起始时刻与终止时刻计算步态周期的思路，起始时刻由大于某一正向运动加速度阈值（0.6）的时刻确定，终止时刻由大于某一负向运动加速度阈值（-0.6）的时刻确定，终止时刻和起始时刻之间被认为是静止状态，但是当行人处于连续步行动作时，该方法容易忽略终止时刻到起始时刻之间的时间，导致步态周期估算不够准确。改进有限状态机（improved finite state machine, IFSM）步态探测算法设定7个状态，并与步行过程中合加速度变化趋势一一对应，利用相邻合加速度差值和上/下坡次数阈值实现准确的步数识别和周期确定。

### 2.1 预处理

利用智能手机获得三轴加速度计算得到合加速度模值，如公式(1)所示， $A$ 表示合加速度模值， $a_x$ 、 $a_y$ 和 $a_z$ 为三轴加速度。

$$A = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} \quad (1)$$

智能手机内置的消费级加速度计噪声多、精度低，长时间运行会产生误差累积，需进行滤波处理以减小噪声对行人航位推算的影响。Yang<sup>[25]</sup>和裴凌<sup>[26]</sup>采用窗口大小为5的移动平均法对加速度进行平滑处理，以减轻随机噪声影响；郭英<sup>[22]</sup>采用3项加权移动平均法和卡尔曼滤波进行预处理以消除抖动误差；王革超<sup>[24]</sup>采用卡尔曼滤波进行噪声消除和数据平滑；王博远<sup>[27]</sup>利用15Hz截止频率的巴特沃兹低通滤波消除高频噪声，并用移动平均法进行平滑，取得了较好的效果。尽管滤波处理能够使数据平滑，剔除部分高频噪声，但也使得平滑后的加速度数据对运动不敏感。此外，考虑到智能手机有限的计算能力和电量，不宜对加速度进行过多滤波处理。采用窗口大小为5的移动平均法对合加速度模值进行滤波处理。

### 2.2 改进的有限状态机

图3表示步行过程中两个步态周期内合加速度模值变化情况以及对应状态，从图中可以看出一个步态周期内的合加速度基本上满足“先增大后减小再增大”的趋势，近似为“先上坡后下坡再上坡”的过程。假设

一个完整步态周期经历“平稳（起始）-上坡-波峰-下坡-波谷-上坡-平稳（结束）”7个状态，分别用 $s_0 \sim s_6$ 表示。

平稳（起始）状态 $s_0$ ：两只脚掌与地面重合，合加速度模值大小约为 $9.81\text{m/s}^2$ ；上坡状态 $s_1$ ：脚后跟开始离地，合加速度模值不断增大；波峰状态 $s_2$ ：脚尖离地，合加速度模值达到最大；下坡状态 $s_3$ ：抬腿至最高后向下迈步的过程，合加速度模值不断减小；波谷状态 $s_4$ ：脚后跟开始着地，合加速度模值达到最小；上坡状态 $s_5$ ：脚掌着地过程，合加速度模值开始增大；平稳（结束）状态 $s_6$ ：脚尖着地，合加速度模值大小恢复到状态 $s_0$ 下。一个完整的步态周期为状态 $s_0$ 和 $s_6$ 之间的时间。

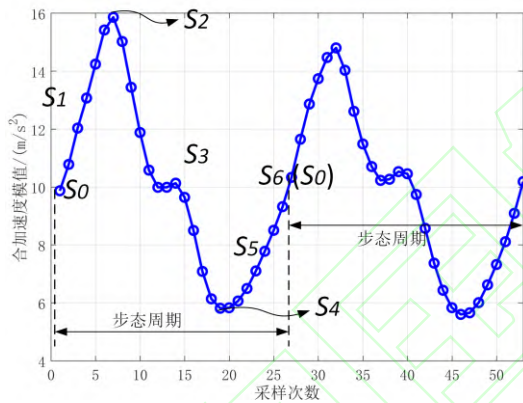


图 3 步行过程中合加速度模值变化与对应状态  
Fig.3 The Variation of Resultant Acceleration Magnitude during Walking and Corresponding States

### 2.3 改进的步态探测算法描述

采用合加速度差值、上坡和下坡次数阈值实现7个状态识别和转移以及步态周期确定，设： $A^T$ 为合加速度模值阈值，用于判定进入上坡状态 $s_1$ 和结束状态 $s_6$ ； $A_D^T$ 为相邻两个时刻合加速度模值差值的阈值，用于统计上/下坡次数； $T_C^1$ 和 $T_C^2$ 为第1次和第2次上坡次数阈值； $T_D^T$ 为下坡次数阈值； $T_C^D$ 为上坡过程中下坡次数干扰阈值； $\delta$ 为判定结束状态 $s_6$ 时合加速度模值的容忍限差。

当相邻两个时刻合加速度模值之差的绝对值大于差值阈值 $A_D^T$ 时，上/下坡次数加1，如公式(2)所示，其中， $T_C^k$ 和 $T_D^k$ 分别表示 $k$ 时刻统计的上坡和下坡次数， $A_k$ 为 $k$

时刻的合加速度模值。

$$\begin{cases} T_C^k = T_C^{k-1} + 1, & A_k - A_{k-1} > A_D^T \\ T_D^k = T_D^{k-1} + 1, & A_k - A_{k-1} < -A_D^T \end{cases} \quad (2)$$

图4为改进步态探测算法流程图，详细步骤如下：

1) 起始状态 $s_0$  设上坡次数 $T_C$  和下坡次数 $T_D$  为0，当 $A_k$  大于 $A^T$  时进入上坡状态 $s_1$ ，计为 $t_0$  时刻；

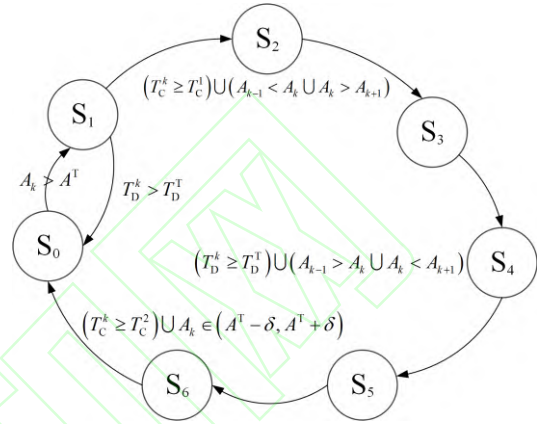


图 4 改进的步态探测算法流程图  
Fig.4 The Flow Diagram of Improved Step Detection Algorithm

2) 由于抖动或晃动等原因，合加速度模值存在伪波峰，上坡次数 $T_C$  和下坡次数 $T_D$  都会发生变化，若下坡次数 $T_D$  大于等于上坡过程中下坡次数干扰阈值 $T_C^D$ ，返回起始状态 $s_0$ ，若上坡次数 $T_C$  大于第1次上坡次数阈值 $T_C^1$ ，并且同时满足 $k$ 时刻的合加速度模值 $A_k$  大于 $k-1$ 时刻 $A_{k-1}$ 和 $k+1$ 时刻 $A_{k+1}$ ，则进入波峰状态 $s_2$ ；

3) 波峰状态 $s_2$  将下坡次数 $T_D$  置为0，并进入下坡状态 $s_3$ ；

4) 下坡状态 $s_3$  统计下坡次数 $T_D$ ，若下坡次数 $T_D$  大于下坡次数阈值 $T_D^T$ ，并且同时满足 $k$ 时刻的合加速度模值 $A_k$  小于 $k-1$ 时刻 $A_{k-1}$ 和 $k+1$ 时刻 $A_{k+1}$ ，则进入波谷状态 $s_4$ ；

5) 波谷状态 $s_4$  将上坡次数 $T_C$  置为0，然后进入上坡状态 $s_5$ ；

6) 上坡状态 $s_5$  统计上坡次数 $T_C$ ，若上坡次数 $T_C$  大于第2次上坡次数阈值 $T_C^2$ ，并且同时满足 $k$ 时刻的合加速度模值 $A_k$  大于

( $A^T - \delta$ ) 或  $A_k$  小于 ( $A^T + \delta$ ), 则进入结束状态  $s_e$ ;

7) 结束状态  $s_e$  将步数加1, 进入开始状态  $s_0$ , 完成一个步态探测, 计为  $t_e$  时刻;

8) 重复步骤1) 至7) 完成连续步态探测, 步态周期  $T$  可通过  $t_e$  减去  $t_0$  获得。

IFSM步态探测算法中变量的经验值, 如表1所示。

表1 IFSM步态探测算法中的经验参数

Tab.1 Empirical Parameters in IFSM Step Detection

Algorithm	
变量	数值
$A_{Thr}$ ( $m/s^2$ )	9.81
$A_{diff\_Thr}$ ( $m/s^2$ )	0.04
$T_{Cl\_Thr\_1}$ (次)	4
$T_{De\_Thr}$ (次)	7
$T_{Cl\_Thr\_2}$ (次)	5
$T_{Dis\_Thr}$ (次)	3
$\delta$ ( $m/s^2$ )	0.2

### 3实验与分析

#### 3.1 实验描述

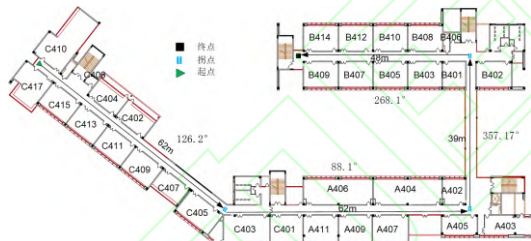


图5 实验路线

Fig.5 The Experimental Route

在如图5所示中国矿业大学室内外无缝定位试验场开展步态探测实验, 由2名实验人员分别平端智能手机在4段走廊内步行211米完成数据采集, 实验人员为男女各1名, 男性身高为1.77米, 女性身高为1.58米, 智能手机型号为小米6。加速度采样频率为50Hz, 采集过程连续, 在走廊拐弯处无停留, 男性和女性实验人员的真实步数分别为284和319步。加速度数据已上传至Github共享 (<https://github.com/renwudao24/AccDataForStepDetection>)。由于王革超<sup>[24]</sup>已经实验验证AD-FSM优于Alzantot<sup>[17]</sup>和Yim<sup>[23]</sup>提出的有限状态机步态探测算法; 而波峰检测法的加

速度阈值因人而异, 且没有明确步态周期的计算方法, 因此, 采用AD-FSM<sup>[24]</sup>和自相关分析算法<sup>[14]</sup>与IFSM算法分别进行步态探测, 统计识别步数, 估算每一步的步态周期和时间偏差。同时, 假设平均步长为走廊总长除以上述各种算法的统计步数, 步行过程中每一步的航向角都与所处每段走廊的坐标方位角一致, 并且上述各种算法都准确识别各段走廊拐弯处。

#### 3.2 实验分析

统计AD-FSM、自相关分析和IFSM算法的识别步数, 如表2所示, AD-FSM和自相关分析算法都存在一定的识别步数偏差, AD-FSM基于男性和女性实验人员数据的识别步数偏差分别为2和3, 准确率分别为99.3%和99.06%, 自相关分析基于男性和女性实验人员数据的识别步数偏差分别为5和3, 准确率分别为98.24%和99.06%, 而IFSM算法基于男性和女性实验人员数据的识别步数准确率均为100%。相比于AD-FSM算法和自相关分析算法, IFSM算法的步数识别准确率分别至少提高了0.7%和1.76%。

表2 三种算法步数识别统计

Tab.2 Statistics of Step Recognition by using Three Algorithms

实验人员	算法	实际步数	识别步数	偏差
男	AD-FSM		282	2
	自相关分析	284	279	5
	IFSM		284	0
女	AD-FSM		316	3
	自相关分析	319	316	3
	IFSM		319	0

以男性实验人员前10步的实验数据为例, 分析三种步态探测算法的步态周期和时间延迟。如图6所示为AD-FSM、自相关分析和IFSM步态探测算法基于男性实验人员加速度数据识别前10步中每一步的完成时间, 图中的黑色十字、红色三角形、蓝色矩形和绿色圆点分别表示实际时间(观察合加速度模值波形人为识别)、AD-FSM、自相关分析和IFSM识别时间。从图中可以看出, 对于每一步而言, 红色三角形都在黑色十字

的上方，而且距离较远，这说明AD-FSM识别每一步都存在明显的时间延迟；蓝色矩形和绿色圆点都在黑色十字的左边，且非常接近，这说明自相关分析和IFSM算法都能提前识别每一步完成时间，而且绿色圆点更接近黑色十字，说明IFSM算法识别每一步的时间更准确。

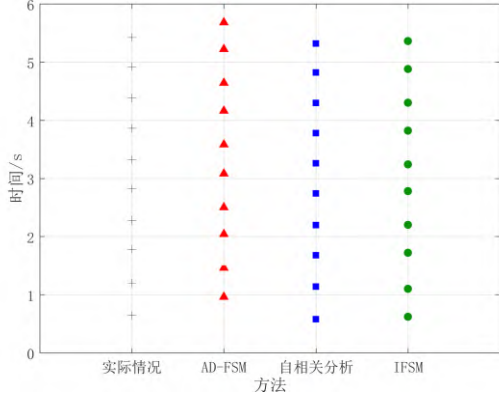


图 6 前10步的识别时间  
Fig.6 Identification Time of First 10 Steps

每一步的实际时间与三种算法识别每一步时间统计如表3所示，从表中可以看出，在前10步识别中，AD-FSM算法延迟了0.26秒，而自相关分析和IFSM算法分别提前了0.1秒和0.04秒；在识别每一步中，AD-FSM算法平均延迟为0.026秒，自相关分析和IFSM算法分别提前了0.01秒和0.004秒；相比于AD-FSM和自相关分析算法，IFSM算法的同步控制准确率分别提高了84.6%和60%。

表 3 三种算法识别步数时间统计（秒）  
Tab.3 Statistics of Step Recognition Time by using Three Algorithms (s)

步数	实际	AD-FSM	自相关分析	IFSM
1	0.64	0.96	0.58	0.64
2	0.56	0.5	0.56	0.48
3	0.58	0.58	0.54	0.62
4	0.5	0.56	0.52	0.48
5	0.54	0.58	0.54	0.58
6	0.5	0.5	0.52	0.46
7	0.54	0.58	0.52	0.58
8	0.52	0.48	0.52	0.48
9	0.54	0.58	0.52	0.58
10	0.5	0.46	0.5	0.48
合计	5.42	5.68	5.32	5.38

平均 0.542 0.568 0.532 0.538

以男性实验人员步行加速度数据为例，分别利用IFSM、AD-FSM以及自相关分析算法进行航位推算，形成PDR轨迹如图7所示，真实路径、IFSM、AD-FSM和自相关分析算法分别用黑、绿、红和蓝线表示，从图中可以看出，IFSM算法形成的轨迹与真实路径最接近，AD-FSM和自相关分析算法形成轨迹距离真实路径的偏移较多。

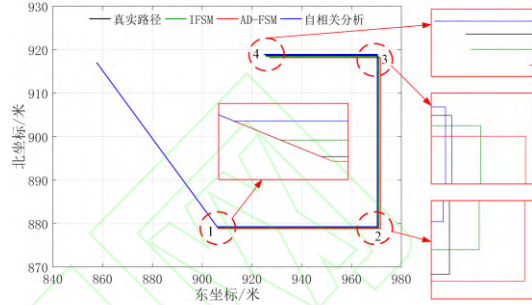


图 7 行人航位推算轨迹  
Fig.7 The Trajectory of PDR

统计上述三种算法在图7中拐弯点1~3以及终点4处的位置误差，如表4所示。从表中可以，自相关分析算法在第1个拐弯点处的位置误差非常小，第2~4号点都有较大的位置误差，4个点的平均误差为1.006米，而且存在5次步数识别偏差，这说明拐弯后自相关分析算法容易出现步数误判，并导致较大位置误差；AD-FSM算法的平均位置误差为0.487米，由于具有较高步数识别准确率，其位置误差较小；IFSM算法在4个点处的位置误差均小于0.52米，平均位置误差为0.384米，相比于自相关分析和AD-FSM算法平均位置误差分别减小了61.83%和21.15%。

表 4 三种算法位置误差统计（米）  
Tab.4 Statistics of Location Error by using Three Algorithms (m)

位置	AD-FSM	自相关分析	IFSM
1	0.581	0.079	0.270
2	0.370	1.120	0.473
3	0.233	1.235	0.511
4	0.765	1.588	0.284
平均	0.487	1.006	0.384

综上，IFSM步态探测算法不仅能够准确识别步数和准确计算步态周期，在同步控制方面也优于现有算法，而且航位推算的位置误差小于现有算法。

## 4结论与展望

本文提出了一种面向智能手机平端活动的改进有限状态机步态探测算法,通过分解行走动作并分析行走一步时运动参数的周期性变化规律,设定有限个状态与步行过程中合加速度模值变化趋势对应,利用合加速度模值差值和上/下坡次数阈值实现状态识别和状态转移,从而实现一步准确识别和步态周期准确估计。由2名实验人员分别平端智能手机在211米走廊内开展步行探测和行人航位推算实验,通过与现有算法对比分析发现,IFSM步态探测算法不仅能够准确识别步数和准确计算步态周期,在同步控制方面也优于现有算法,而且航位推算的位置误差小于现有算法。具体表现为:

(1) 由于采用合加速度模值差分和上/下坡次数阈值实现步数识别,能够避免行人因不同步行方式或速度产生的加速度差异造成的步数误判,基于一男一女实验人员的加速度数据步数识别准确率为100%,优于现有算法。

(2) 将有限个状态与步行过程中的合加速度模值变化趋势对应,结合标准重力加速度和第2次上坡次数阈值识别一步的开始和结束状态,可以准确每一步的步态周期,而且同步控制准确率优于现有算法。

(3) IFSM算法可以准确识别步数,且不受拐弯活动的影响,行走211米的累积误差、平均误差和最大误差分别为0.284米、0.384米和0.511米,该步态探测算法能够满足室内亚米级定位需求。

在后续研究中,将增加实验人员人数、选择复杂的实验路线和不同智能手机验证平端智能手机活动下IFSM算法的有效性。此外,为了满足现阶段室内复杂场景下的亚米级定位需求,将结合机器学习和活动识别方法研究不同活动下多模式的高精度步态探测算法。

### 参考文献 (References)

- [1] Bi J, Wang Y, Li X, et al. An Adaptive Weighted KNN Positioning Method Based on Omnidirectional Fingerprint Database and Twice Affinity Propagation Clustering[J]. *Sensors*, 2018, 18(8): 2502-2518.
- [2] BI Jingxue. Study on Optimization Problem of Wi-Fi/PDR Indoor Hybrid Positioning on Smartphone[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.(毕京学. 智能手机Wi-Fi/PDR室内混合定位优化问题研究[D]. 中国矿业大学,2019.)
- [3] ZHOU Baoding, LI Qingquan, MAO Qingzhou, et al. User Activity Awareness Assisted Indoor Pedestrian Localization[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(6): 719-723.(周宝定, 李清泉, 毛庆洲, 等. 用户行为感知辅助的室内行人定位[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2014, 39(6): 719-723.)
- [4] XIONG Hanjiang, GUO Sheng, ZHENG Xianwei, et al. Indoor Pedestrian Mobile Activity Recognition and Trajectory Tracking[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018,43(11):1696-1703.(熊汉江, 郭胜, 郑先伟, 等. 室内行人移动行为识别及轨迹追踪 [J]. 武汉大学学报·信息科学版,2018,43(11):1696-1703.)
- [5] Levi R W, Judd T. Dead Reckoning Navigational System Using Accelerometer to Measure Foot Impacts: U.S. Patent 5,583,776[P]. 1996-12-10.
- [6] CHEN Guoliang, ZHANG Yanzhe, WANG Yunjia, et al. Unscented Kalman Filter Algorithm for WiFi-PDR Integrated Indoor Positioning[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2015, 44(12):1314-1321.(陈国良, 张言哲, 汪云甲, 等. WiFi-PDR室内组合定位的无迹卡尔曼滤波算法[J]. 测绘学报,2015,44(12):1314-1321.)
- [7] Zhou B, Li Q, Mao Q, et al. Activity Sequence-Based Indoor Pedestrian Localization Using Smartphones[J]. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 2017, 45(5):562-574.
- [8] Shin B, Kim C, Kim J, et al. Motion Recognition-Based 3D Pedestrian Navigation System Using Smartphone[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, 16(18): 6977-6989.
- [9] Kang W, Han Y. SmartPDR: Smartphone-Based Pedestrian Dead Reckoning for Indoor



- Localization[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2015, 15(5): 2906-2916.
- [10] Chen Z, Zou H, Jiang H, et al. Fusion of WiFi, Smartphone Sensors and Landmarks Using the Kalman Filter for Indoor Localization[J]. *Sensors*, 2015, 15(1): 715-732.
- [11] Ruiz A R J, Granja F S, Honorato J C P, et al. Accurate Pedestrian Indoor Navigation by Tightly Coupling Foot-mounted IMU and RFID Measurements[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2012, 61(1): 178-189.
- [12] Pinchin J, Hide C, Moore T. A Particle Filter Approach to Indoor Navigation Using a Foot Mounted Inertial Navigation System and Heuristic Heading Information[C]. 2012 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN). IEEE, 2012: 1-10.
- [13] Pan M S, Lin H W. A Step Counting Algorithm for Smartphone Users: Design and Implementation[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2015, 15(4): 2296-2305.
- [14] CHEN Guoliang, ZHANG Yanzhe, YANG Zhou. Realization of Pedometer with Auto-correlation Analysis Based on Mobile Phone Sensor[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2014,22(6):794-798.(陈国良,张言哲,杨洲.一种基于手机传感器自相关分析的计步器实现方法[J].中国惯性技术学报,2014,22(6):794-798.)
- [15] D'Irican A C, Aksoy S. Step Counting Using Smartphone Accelerometer and Fast Fourier Transform[J]. *Sigma J. Eng. Nat. Sci*, 2017, 8: 175-182.
- [16] Kang X, Huang B, Qi G. A Novel Walking Detection and Step Counting Algorithm Using Unconstrained Smartphones[J]. *Sensors*, 2018, 18(1): 297-311.
- [17] Alzantot M, Youssef M. UPTIME: Ubiquitous Pedestrian Tracking Using Mobile Phones[C]. 2012 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). IEEE, 2012: 3204-3209.
- [18] Jang, Kim, Hwang. Robust Step Detection Method for Pedestrian Navigation Systems[J]. *Electronics Letters*, 2007, 43(14):749-751.
- [19] Jayalath S, Abhayasinghe N. A Gyroscopic Data Based Pedometer Algorithm[C]. 2013 8th International Conference on Computer Science & Education. IEEE, 2013: 551-555.
- [20] Tang Z, Guo Y, Chen X. Self-adaptive Step Counting on Smartphones Under Unrestricted Stepping Modes[C]. 2016 IEEE 40th Annual Computer Software and Applications Conference (COMPSAC). IEEE, 2016, 1: 788-797.
- [21] Huang B, Qi G, Yang X, et al. Exploiting Cyclic Features of Walking for Pedestrian Dead Reckoning with Unconstrained Smartphones[C]. Proceedings of the 2016 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing. 2016: 374-385.
- [22] GUO Ying, LIU Qinghua, JI Xianlei, et al. Pedestrian Gait Analysis Based on Mobile Phone Accelerometer[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2017, 25(6): 708-712.(郭英,刘清华,姬现磊,等.基于手机加速度计的行人步态分析[J].中国惯性技术学报,2017,25(6):708-712.)
- [23] Yim J. A Smartphone Indoor Positioning Method[J]. *International Journal of Smart Home*, 2013, 7(5):9-18.
- [24] WANG Gechao, LIANG Yongzhen, CHEN Jing, et al. Step Counting Algorithm Based on Finite State Machine Using Acceleration Differential[J]. *Journal of Frontiers of Computer Science and Technology*, 2016, 10(8):1133-1142.(王革超,梁久祯,陈璟,等.加速度差分有限状态机计步算法[J].计算机科学与探索,2016,10(8):1133-1142.)
- [25] Yang J. Toward Physical Activity Diary: Motion Recognition Using Simple Acceleration Features with Mobile Phones[C]. Proceedings of the 1st international workshop on Interactive multimedia for consumer electronics. ACM, 2009: 1-10.
- [26] Pei L, Chen R, Liu J, et al. Motion Recognition Assisted Indoor Wireless Navigation on a Mobile Phone[C]. Proceedings of the 23rd International

Technical Meeting of the Satellite Division of the  
Institute of Navigation. 2010: 3366-3375.  
[27] Wang B, Liu X, Yu B, et al. Pedestrian Dead

Reckoning Based on Motion Mode Recognition  
Using a Smartphone[J]. *Sensors*, 2018, 18(6):  
1811-1834.

## Improved Finite State Machine Step Detection Algorithm for Smartphone

BI Jingxue<sup>1</sup> ZHEN Jie<sup>2</sup> YAO Guobiao<sup>1</sup> SANG Wengang<sup>1</sup> NING Yipeng<sup>1</sup> GUO Qiuying<sup>1</sup>

<sup>1</sup> College of Surveying and Geo-Informatics, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China

<sup>2</sup> Chinese Academy Surveying and Mapping, Beijing 100830, China

**Abstract:** To solve the problems in pedestrian dead reckoning algorithms for indoor positioning, of which the step recognition accuracy for step detection is not high enough, the synchronous control is not precise enough, and there is a large location deviation. An algorithm of improved finite state machine step detection for the activity of flat holding smartphone was proposed. A finite number of states were set to correspond to the trend of resultant acceleration variation during walking. Step detection and step cycle estimation were realized based on adjacent resultant acceleration difference and several thresholds of climbing and descending times. Experimental tests were conducted by two testers in 211 meters corridors with flat holding smartphone, respectively. Experimental results show that the accuracy of two step detection tests are both 100% by using the improved algorithm. It is 0.004 seconds earlier on average than the actual time for each step. And the average location error is 0.384m. Compared to the auto-correction analysis and acceleration differential based on finite state machine algorithms, the accuracy of step recognition, synchronous control and location estimation are improved at least 0.7%, 60% and 21.15%, respectively. The proposed algorithm behaves better than the existing algorithms in the aspects of the step recognition, the synchronous control and location estimation.

**Keywords:** indoor positioning; pedestrian dead reckoning; step detection; finite state machine; resultant acceleration difference; times threshold

**First Author:** BI Jingxue, PhD, lecturer, specializes in the indoor multi-source hybrid smart positioning, indoor and outdoor seamless positioning. E-mail: bxj1050@163.com

**\*Corresponding author:** ZHEN Jie, PhD, professor. E-mail: zhenjie@casm.ac.cn

**Foundation Support:** This work was funded by National Key Research and Development Program of China(2016YFC0803102, 2016YFB0502102); Open Research Fund Program of State Key Laboratory of Satellite Navigation System and Equipment Technology(CEPNT-2018KF-03); Introduction & Training Program of Young Creative Talents of Shandong Province(0031802); Open Research Fund Program of Shandong Jianzhu University(2019yzkf159); Shandong Provincial Natural Science Foundation(ZR2017MD029); Key Laboratory of Surveying and Mapping Science and Geospatial Information Technology of Ministry of Natural Resources(2020-3-4); Doctoral Research Fund of Shandong Jianzhu University(XNBS1985).

**标题:** 面向智能手机的改进有限状态机步态探测算法

**作者:** 毕京学, 甄杰, 姚国标, 桑文刚, 宁一鹏, 郭秋英

**收稿日期:** 2020-04-20

DOI:10.13203/j.whugis20200186

**引用格式:**

毕京学, 甄杰, 姚国标, 等. 面向智能手机的改进有限状态机步态探测算法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2020, DOI:10.13203/j.whugis20200186 (BI Jingxue, ZHEN Jie, YAO Guobiao, et al. Improved Finite State Machine Step Detection Algorithm for Smartphone[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2020, DOI:10.13203/j.whugis20200186)

**网络首发文章内容和格式与正式出版会有细微差别, 请以正式出版文件为准!**

**您感兴趣的其他相关论文:**

**一种单基站高精度室内应急定位方法**

甄杰, 吴建新, 刘纪平, 徐胜华, 周振发, 辛海强

武汉大学学报·信息科学版, 2020, 45(8): 1146-1154

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20200128>

**一种融合行人预测信息的局部路径规划算法**

赵青, 陈勇, 罗斌, 张良培

武汉大学学报·信息科学版, 2020, 45(5): 667-675

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20200105>

**应急救援无缝定位关键技术研究**

王坚, 刘纪平, 韩厚增, 甄杰, 刘飞

武汉大学学报·信息科学版, 2020, 45(8): 1126-1136

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20200066>